

# La fine del ghiaccio artico ed il futuro del clima

**Francesco Paparella**

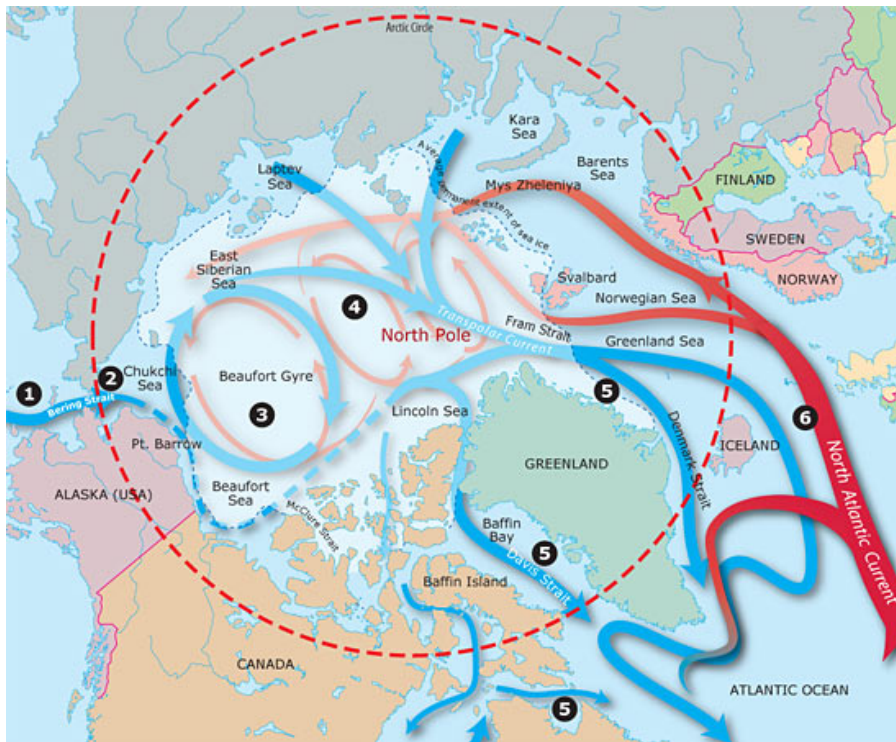
Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento

**I**l dibattito riguardo ai cambiamenti climatici furoreggia sui mezzi di comunicazione di massa. All'indomani di alluvioni, periodi di siccità, tempeste di neve o ondate di calore c'è chi paventa i cambiamenti climatici. Ma questo genere di disastri è sempre esistito, e nessuno di essi, preso singolarmente, può dare informazioni riguardo al clima. Esiste dunque un evento che, se si verificasse, sarebbe da solo la prova inconfutabile che il nostro pianeta sta per entrare in un nuovo regime climatico? Un simile evento esiste, ed il fatto che verosimilmente si verificherà entro qualche decennio non è una buona notizia.

Riguardo all'uragano che ha investito New York alla fine di Ottobre 2012, l'autorevolissimo New York Times scrive: *Sandy non può essere considerato un disastro stagionale o una coincidenza regionale, ma è un ulteriore segnale delle calamità che ci aspettano in un'epoca di cambiamenti climatici* [1]. Siamo abituati a sentire commenti analoghi dopo ogni evento meteorologico estremo che abbia causato vittime o ingenti danni. Nell'immediatezza dell'evento può capitare che amministratori e politici si autoassolvano da miopi scelte del passato usando i cambiamenti climatici come utile capro espiatorio, salvo poi omettere di intraprendere costose e forse impopolari decisioni sulla

gestione del territorio che mitighino i danni di altri eventi del genere. Atteggiamenti di questo tipo, privi di qualunque giustificazione scientifica, rendono forti le argomentazioni di coloro che negano che sia davvero in atto un cambiamento climatico: i clima-scettici. A New York nessuno ha ancora dimenticato Sandy, ma tutti hanno osservato che durante quest'anno si sono formate solo tredici grandi tempeste atlantiche (contro diciannove nel 2012) e solo due di esse sono state un uragano [2] (contro dieci dell'estate scorsa). Quest'anno le notizie tragiche sono arrivate dalle Filippine, dove il passaggio del tifone Haiyan / Yolanda ha causato una orrenda catastrofe. Ma se anche questo tifone, come molti altri prima di lui avesse proseguito la sua corsa rimanendo sul Pacifico, anziché attraversare una zona densamente popolata, di lui sarebbe rimasta solo una riga negli annali della meteorologia. Per i clima-scettici è facile dichiarare che il re è nudo, e denunciare come ipocrite le campagne degli attivisti ambientali [3].

In realtà, solo il lento accumularsi dell'evidenza statistica può mostrare se la frequenza degli eventi meteorologici estremi stia aumentando oppure no, e questo processo si scontra quotidianamente con la necessità di confrontare le statistiche relative al presente con quelle assai lacunose che riguardano il passato. Si tratta di un lavoro certosino che non si adatta a essere strillato sulle prime pagine dei giornali e che lascia ampi margini alle critiche di chi chiede interval-



**Figura 1:** Mappa dell'Oceano Artico e delle sue principali correnti. Tratta da <http://www.divediscover.whoi.edu/arctic/circulation.html>

li di fiducia più stretti e maggiori evidenze sui rapporti tra cause ed effetti.

Eppure esistono ottime ragioni per sostenere che il clima stia cambiando, e che lo stia facendo per cause *antropogeniche* (cioè legate alle attività degli esseri umani). Fra i segnali che meno lasciano adito a dubbi sulla realtà del cambiamento ce ne sono alcuni che sono molto evidenti, anche se non molto pubblicizzati, in quanto non avvengono a ridosso delle grandi città, ma in un luogo remoto: l'Oceano Artico.

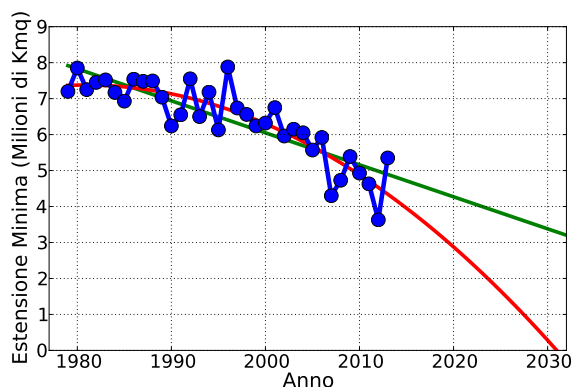
## Il declino dei ghiacci artici

I due poli del nostro pianeta sono geograficamente assai diversi. Il Polo Sud è occupato da un continente (l'Antartide) sulle cui terre si stende una sterminata calotta glaciale. Solo una piccola parte di essa si estende oltre la linea di costa e galleggia sull'oceano, rimanendo precariamente agganciata alla terra ferma. Il Polo Nord è occupato da un oceano (l'Oceano Artico), chiuso a tenaglia fra il Nord America e l'Eurasia. Da un lato esso è collegato con il Pacifico tramite lo Stretto di Bering, dall'altro la Groenlandia e le isole Svalbard delimitano lo stretto di Fram, che collega l'Artico con l'Atlantico (Figura 1).

Gran parte della superficie dell'Artico è coperta da ghiacci marini, la *banchisa*. Non si tratta,

nel suo complesso, di un singolo blocco rigido che si estende per migliaia di chilometri, bensì di un coacervo di innumerevoli lastroni di ghiaccio che galleggiano a contatto gli uni con gli altri, trasportati da venti e correnti, e che in continuazione si scontrano, si frammentano, si risaldano. La copertura non è mai perfetta: anche durante il più freddo degli inverni, i ghiacci occasionalmente si separano fino a lasciare temporaneamente libere superfici di acqua liquida.

I forti venti artici muovono grandi masse d'acqua, che si auto-organizzano in complessi sistemi di correnti, e trasportano la banchisa che fluttua su di esse. La principale è la ricircolazione di Beaufort (*Beaufort gyre*): una corrente che si richiude ad anello su sé stessa, localizzata fra le coste del Canada e quelle della Siberia orientale. I maggiori scambi d'acqua avvengono tra l'Oceano Artico e l'Oceano Atlantico. Le ultime propaggini della Corrente Nord Atlantica entrano nell'Artico scorrendo lungo la Scandinavia e la Siberia occidentale, mentre la Corrente Transpolare si forma non lontano dal Polo Nord dall'unione di più correnti minori e si getta nell'Atlantico scorrendo lungo la Groenlandia. Questa corrente trasporta verso sud anche grandi quantità di ghiaccio, che si sciolgono prontamente appena raggiungono latitudini inferiori. Ciò vuol dire che la quantità di ghiaccio presente nell'Artico



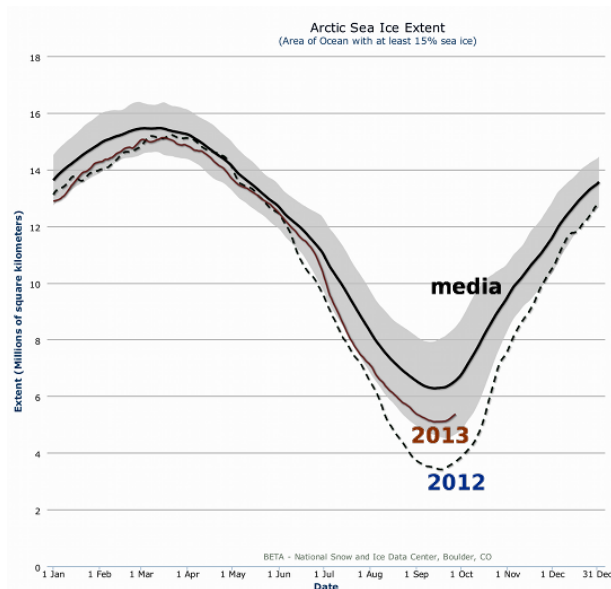
**Figura 2:** Estensione media dei ghiacci artici durante il mese di settembre (linea blu). La linea verde è una interpolazione lineare dei dati e raggiunge lo zero attorno al 2070. La linea rossa è una interpolazione quadratica. Dati tratti da [4].

dipende anche dal modo in cui i venti modulano le correnti marine che entrano ed escono da esso.

L'area coperta dai ghiacci artici è soggetta ad una notevole escursione stagionale. La massima estensione della banchisa si registra a marzo, la minima a settembre, ed è meno della metà della massima. A partire dal 1979 l'estensione dei ghiacci marini artici è stata misurata, con notevole accuratezza, sulla base di immagini satellitari. Il minimo assoluto in questa serie di dati è stato registrato nel settembre 2012, con una estensione inferiore a quattro milioni di chilometri quadrati (Figura 3). Nel 2013 il minimo non è stato così pronunciato, pur rimanendo molto al di sotto del valore medio.

La serie storica delle misure satellitari mostra che l'estensione dei ghiacci artici ha avuto una generale tendenza alla diminuzione. In particolare, i valori dell'estensione media durante il mese di settembre mostrano una tendenza accelerata al ribasso (Figura 2). Una semplice interpolazione lineare dei dati suggerisce che la banchisa estiva sparirà non oltre il settembre 2070. Una più accurata interpolazione quadratica sposta questa data a poco dopo il 2030.

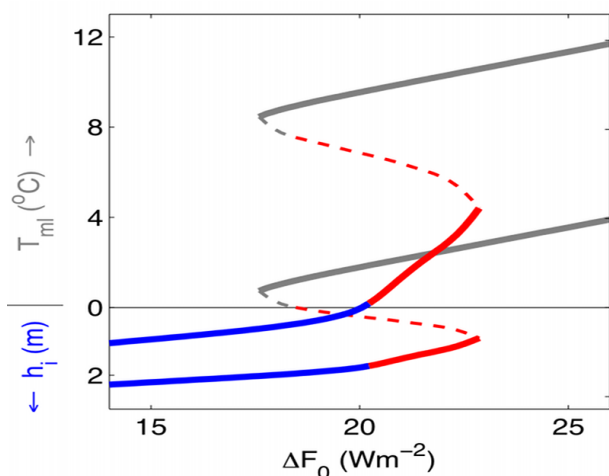
A rendere ancora più preoccupante la tendenza al ribasso c'è anche il fatto che la percentuale di ghiaccio con età maggiore di un anno è anch'essa in diminuzione. Il ghiaccio con meno di un anno (poco spesso e facilmente frammentabile) è passato dal 50% al 75% della copertura. Il ghiaccio con più di quattro anni è passato dal 25% al 2% [4].



**Figura 3:** Estensione dei ghiacci artici nel 2012 (linea tratteggiata) e fino al settembre 2013 linea continua marrone. La linea nera rappresenta l'estensione media negli anni 1981-2010. L'area grigia corrisponde a più o meno due deviazioni standard intorno alla media. Tratto da [4].

È del tutto ovvio che previsioni effettuate estrapolando in avanti nel tempo mere interpolazioni dei dati si limitano a suggerire delle tendenze, ma non hanno una base fisica. Una descrizione fisica dei ghiacci artici deve includere tre elementi: una parte termodinamica che descriva la formazione e lo scioglimento del ghiaccio sulla base della temperatura e dei flussi di calore locali; una parte fluidodinamica, che descriva il trasporto del ghiaccio da parte delle correnti e dei venti; ed infine la retroazione ghiaccio-albedo. Quest'ultimo punto è particolarmente importante. Poiché il ghiaccio è bianco, esso riflette verso l'alto buona parte della radiazione incidente: il ghiaccio ha una alta albedo. Al contrario, l'acqua liquida lascia penetrare la maggior parte della radiazione incidente, assorbendola e scaldandosi (la superficie del mare infatti è blu scura): l'acqua liquida ha una bassa albedo. Questo effetto apre la possibilità di avere due stati stabili corrispondenti alla stessa forzante termica: uno stato caldo, con acqua liquida, in cui la radiazione solare è in gran parte assorbita ed usata per scaldare l'ambiente; ed uno freddo, con estesa copertura di ghiacci, che riflette nello spazio una frazione consistente della radiazione solare.

Un semplice modello climatico illustra bene



**Figura 4:** Equilibri stabili (linea continua) ed instabili (linea tratteggiata) in un semplice modello di ghiaccio artico. La linea superiore si riferisce all'inverno, quella inferiore all'estate. Le linee blu corrispondono allo stato in cui è presente una copertura perenne di ghiacci (situazione odierna), quelle rosse allo stato in cui la copertura dei ghiacci appare solo d'inverno, quelle grigie allo stato senza mai ghiacci. L'asse verticale riporta lo spessore medio dei ghiacci (sotto lo zero) o la temperatura media dell'acqua (sopra lo zero). Il parametro  $\Delta F_0$  (asse orizzontale) è l'incremento del flusso superficiale di calore rispetto ai livelli attuali. Tratto da [5].

questa idea. In Figura 4 le linee indicano lo spessore dei ghiacci, o la temperatura dell'acqua (quando i ghiacci sono assenti) in funzione del parametro  $\Delta F_0$  che misura l'incremento del riscaldamento dell'Artico rispetto ai livelli attuali. Le due linee blu rappresentano la situazione in cui la banchisa è perenne. All'aumentare del riscaldamento si passa in un altro regime, in cui il ghiaccio marino esiste solo d'inverno (linee rosse). Questo cambio di regime è reversibile, in quanto una diminuzione del riscaldamento riporta subito il sistema allo stato con una banchisa perenne. Tuttavia, aumentando ancora il riscaldamento (quando  $\Delta F_0 \simeq 23 \text{ Wm}^{-2}$ ), il sistema salta in modo brusco nello stato del tutto privo di ghiacci rappresentato dalle linee grigie. Questa ulteriore transizione è irreversibile, nel senso che, a quel punto, una piccola diminuzione del riscaldamento non riporta il sistema nello stato con ghiacci invernali, ma lo sposta a sinistra lungo le linee grigie: la retroazione ghiaccio-albedo mantiene caldo l'Oceano Artico, e per riformare i ghiacci è necessario una diminuzione del

riscaldamento fino a  $\Delta F_0 \simeq 18 \text{ Wm}^{-2}$ , quando il sistema ripiomba nello stato di copertura glaciale perenne. L'impossibilità di recuperare lo stato precedente ad un cambio di regime semplicemente riportando il parametro di controllo al suo valore originale, è ciò che, con gergo tecnico, si chiama *isteresi*.

Modelli come quello appena discusso sono utili perché indicano quali possano essere i cambiamenti di regime e suggeriscono la possibilità di fenomeni di isteresi. Tuttavia, essi sono troppo semplici per permettere di formulare previsioni riguardo alla data in cui l'Artico potrebbe rimanere privo di ghiacci, sia perché i valori critici del riscaldamento ai quali avvengono le varie transizioni dipendono da parametri non noti con esattezza, sia perché il valore stesso del riscaldamento è una incognita che un modello completo dovrebbe poter prevedere. Per avere un quadro più realistico e dettagliato, i climatologi utilizzano modelli matematici costituiti da enormi sistemi di equazioni che descrivono il moto dell'atmosfera e dell'oceano, la dinamica dei ghiacci, il trasporto degli aerosol, ed in alcuni casi perfino l'evoluzione degli ecosistemi forestali terrestri e la biogeochimica marina. Questi *modelli del sistema Terra*, le cui equazioni sono risolte in modo approssimato da programmi di simulazione che girano su potenti supercalcolatori, hanno l'ambizione di descrivere in modo esauriente le interazioni fra tutti i processi che influenzano il clima, inclusi quelli di natura biologica.

Anche con modelli così complessi ed onnicomprensivi, per poter calcolare l'ammontare del riscaldamento è necessario specificare quali saranno le concentrazioni future dei gas serra in atmosfera. Da questo punto di vista previsioni vere e proprie non se ne possono fare: la concentrazione futura dei gas serra sarà influenzata da decisioni di tipo politico, economico e sociale, che sono soggette al libero arbitrio degli esseri umani. Pertanto, i climatologi hanno preparato molti *scenari* diversi fra loro, corrispondenti a diversi possibili andamenti della concentrazione dei gas serra, ipotizzando molteplici futuri sviluppi socio-economici. Alcuni di questi scenari sono stati codificati formalmente, e sono usati dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* per formulare valutazioni di rischio riguardo al clima del XXI secolo. In particolare, lo scenario



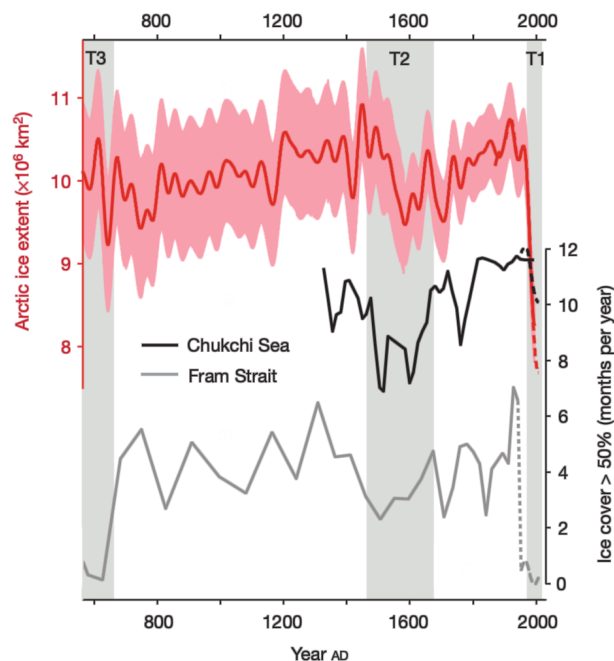
RCP8.5 prescrive un continuo aumento dei gas serra, con ritmi di crescita analoghi a quelli degli ultimi decenni, mentre lo scenario RCP4.5 immagina una crescita assai moderata dei gas serra nella prima parte del secolo, seguita da una successiva stabilizzazione su valori che, pur essendo più alti degli attuali, si spera possano non essere catastrofici.

La Figura 5 riporta l'estensione dei ghiacci marini artici a settembre ricostruita dal 1980 fino al 2005 (linea nera tratteggiata), e quella prevista dal 2006 fino al 2100 mediando fra loro i risultati di 39 diversi modelli (37 per lo scenario RCP8.5, linee tratteggiate blu e rossa). Restringendo la media ai cinque modelli che individualmente meglio riproducono il passato, si ottengono gli andamenti mostrati dalle linee a tratto continuo, mentre le aree ombreggiate mostrano la banda entro cui fluttuano le simulazioni dei cinque modelli.

Ciò che è immediatamente evidente è l'enorme incertezza insita in queste stime. Riguardo all'estensione dei ghiacci artici, modelli diversi tendenzialmente mostrano futuri diversi (ciò non è vero per altre variabili climatologiche, per le quali c'è un ottimo accordo fra i modelli). Ancor più disarmante è che anche i modelli considerati "migliori" sottostimano fortemente sia l'estensione dei ghiacci realmente osservata (linea viola), sia il suo tasso di decrescita.

È pur vero che nell'ultimo decennio i modelli climatici hanno mostrato enormi progressi nella loro capacità di simulare una dinamica realistica dei ghiacci artici. Purtroppo, visti i risultati, è necessario riconoscere che è ancora prematuro considerare i modelli come guida affidabile riguardo ai dettagli del futuro dei ghiacci artici [7]. In effetti, se una conclusione può essere tratta, è che gli attuali modelli del sistema terra sovrastimano la data di sparizione del ghiaccio artico [8].

Per capire se ciò che si osserva è una genuina tendenza al ribasso che porterà in un futuro prossimo alla perdita completa della banchisa artica durante l'estate, oppure se si tratta di una temporanea fluttuazione insita nella naturale variabilità del sistema climatico terrestre, è necessario prendere in considerazione i dati osservativi relativi ad un passato progressivamente più lontano. Infatti, per quanto strano possa sembrare, esisto-



**Figura 6:** Ricostruzione dell'estensione del ghiaccio artico negli ultimi 1450 anni (linea rossa). Le bande rosa indicano il margine di confidenza del 95%. La risoluzione nominale è di 40 anni. Durata, in mesi all'anno, della copertura glaciale nel mare di Chukchi (linea nera) e nello stretto di Fram (linea grigia) ricostruite da carote di sedimento marino. Le linee tratteggiate indicano osservazioni dirette.

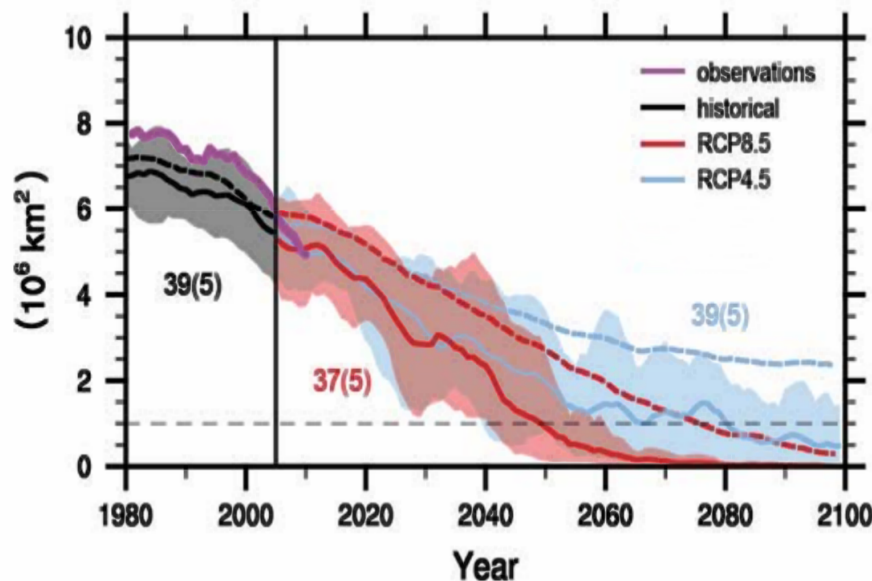
no molti indicatori indiretti, ma misurabili accuratamente, che possono fornirci indizi affidabili riguardo allo stato dell'Artico nel passato.

## L'Artico nel passato

È opinione comune che la promozione pubblicitaria di un prodotto sia un fenomeno moderno. In realtà, già intorno all'anno 985 lo scaltro capo vichingo Erik il Rosso aveva impiegato tecniche analoghe a quelle dei moderni pubblicitari per convincere un gran numero di suoi concittadini islandesi a seguirlo in una terra che egli intendeva colonizzare. Come è scritto nelle saghe, Erik riteneva che "gli uomini sarebbero stati più prontamente persuasi a seguirlo se la nuova terra avesse avuto un nome attraente" [9]. Perciò nel linguaggio dei vichinghi, egli chiamò la colonia *Terra Verde*: Groenlandia!

Preso alla lettera, Erik non mentiva: oggi come allora il racconto di fiordi costieri coperti di morbidi prati verde smeraldo che digradano verso il mare blu cobalto corrisponde alla realtà. Ciò che

## September sea-ice extent



**Figura 5:** Estensione dei ghiacci marini artici durante il mese di settembre simulata da modelli del sistema terra. In blu: scenario RCP4.5; in rosso: scenario RCP8.5; in nero: ricostruzione del passato. Le linee tratteggiate sono la media fra tutti i modelli. Le linee continue sono la media fra i cinque modelli che meglio riproducono le osservazioni (linea continua viola). Le aree ombreggiate indicano il margine di variabilità dei cinque modelli. Le serie di dati sono state smussate con una media mobile quinquennale. Tratto da [6].

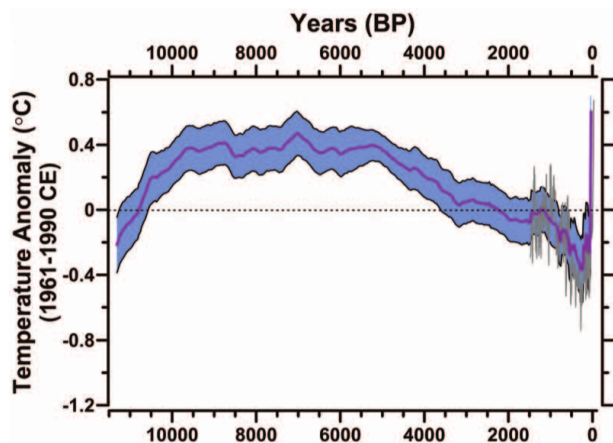
Erik aveva ommesso, da bravo pubblicitario, era di sottolineare che questo paesaggio idilliaco dura al più per un paio di mesi, nel pieno dell'estate. Durante il resto dell'anno, lungo le coste della Groenlandia, il colore dominante nel paesaggio non è certo il verde.

Che i vichinghi della fine del primo millennio abbiano creduto a Erik il Rosso può far sorridere. Ma che ci credano anche molte persone colte del XXI secolo è sconcertante. Capita spesso, infatti, di sentir dire che il declino osservato dei ghiacci artici non è poi così preoccupante: mille anni fa la Groenlandia era una "terra verde", e quindi sicuramente molto più calda di oggi (v. per esempio [10]).

In realtà, quando si cerca di ricostruire il passato dell'Artico usando dati oggettivi, si ottengono risultati simili a quelli della Figura 6. Lunghi cilindri di fango (chiamati, in gergo, *carote*) estratti perforando i sedimenti del fondo dell'Artico, contengono informazioni dettagliate sul clima del passato. Esaminando una carota è possibile misurare l'abbondanza degli scheletri calcarei e silicei delle cellule fitoplanctoniche vissute molti secoli fa e poi cadute sul fondo, sedimentando in strati progressivamente più antichi, a mano a mano che si segue la carota nella sua lunghezza. Poiché il fitoplancton ha serie difficoltà a sopravvivere sotto la banchisa (per il semplice motivo che il ghiaccio filtra buona parte della luce neces-

saria a questi organismi) una bassa quantità di fitoplancton segnala una banchisa pressoché perenne, grande abbondanza è indice di un luogo libero dai ghiacci, e valori intermedi permettono di calcolare per quanti mesi all'anno un certo tratto di mare era coperto dalla banchisa. La tecnica del carotaggio è usata anche sui ghiacciai perenni (presenti in Groenlandia e in molte altre isole artiche). Le carote di ghiaccio mantengono informazioni concernenti la temperatura atmosferica, l'umidità ed il livello di aerosol marini, tutti indicatori che sono legati all'estensione dei ghiacci artici. Tarando con le osservazioni moderne la procedura di analisi dei dati è possibile ricostruire con ragionevole affidabilità l'estensione dei ghiacci artici negli ultimi millecinquecento anni.

La ricostruzione di Figura 6 mostra una apprezzabile variabilità naturale. In particolare sono stati identificati tre periodi caratterizzati da estensioni della banchisa relativamente ridotte (le tre bande grigie). La colonizzazione della Groenlandia da parte dei vichinghi effettivamente avvenne poco dopo la fine del primo di questi periodi miti, e la loro dipartita (poco dopo il 1450) coincide con la massima espansione dei ghiacci. Ma è evidentissimo che queste fluttuazioni (pur ben evidenti) sono piccole se confrontate con la fortissima e repentina diminuzione dell'estensione dei ghiacci osservata negli ultimi



**Figura 7:** Ricostruzione della temperatura media globale degli ultimi 11000 anni (linea viola) con bande di incertezza larghe una deviazione standard (area azzurra). La linea grigia è la ricostruzione di Mann et al. relativa agli ultimi 2000 anni.

decenni.

Andando ancora più indietro nel tempo le evidenze diventano più indirette e frammentarie. È certo che intorno ad 8000 anni fa, all'alba della civiltà umana, la temperatura media globale fosse leggermente più alta che nel XX secolo. Una recente ricostruzione, basata principalmente su carote di sedimento marino, ma contenente anche fonti di dati di origine terrestre, mostra una differenza di circa  $0.4^{\circ}\text{C}$  (Figura 7) [12]. Restrungendo l'attenzione solo all'Artico, è verosimile che le differenze di temperatura fra quell'epoca ed il XX secolo fossero più marcate: probabilmente l'Artico era più caldo di alcuni gradi. Per valutare l'estensione dei ghiacci artici così indietro nel tempo è stato trovato un metodo ingegnoso: si cercano resti di ossa di balena e pezzi di legno spiaggiati lungo le coste delle isole artiche. Quando per buona parte dell'anno la banchisa arriva a lambire la terra è quasi impossibile che le onde portino a secco la carcassa di una balena o un tronco galleggiante. Eventi del genere, invece, sono relativamente comuni quando l'acqua liquida spazza la battigia per tutto l'anno. Integrando queste evidenze indirette con il conteggio del plancton nelle carote di sedimento è stato possibile dedurre che tra 8500 e 6000 anni fa il cosiddetto *passaggio a Nord-Ovest* (la rotta che congiunge l'Atlantico al Pacifico passando a nord del Canada) era spesso libero dai ghiacci, ma l'ipotesi che l'intero Oceano Artico fosse totalmente privo di banchisa, sia pure solo d'estate,

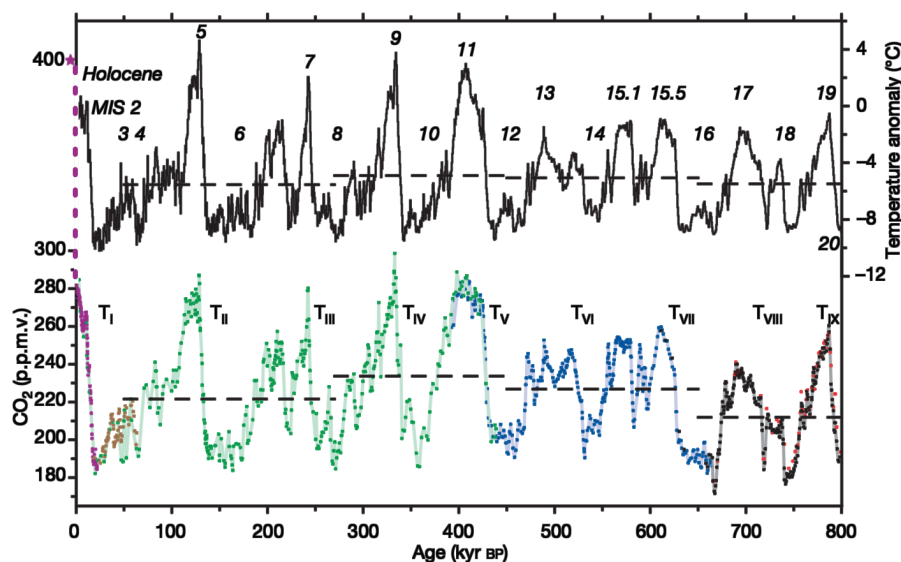
non sembra essere sostenuta dai dati [13].

In effetti, più che la differenza tra la situazione odierna ed il passato, ciò che davvero sbalordisce nella ricostruzioni delle Figure 6 e 7 è la drammatica rapidità con cui una lenta tendenza al raffreddamento arresta il suo corso e si trasforma in riscaldamento con ritmi di crescita senza precedenti.

I geologi fissano a 11700 anni fa l'inizio dell'Olocene (la più recente epoca geologica). L'evento che marca il confine con il precedente Pleistocene è il termine dell'ultima fase glaciale. A partire da circa tre milioni di anni fa il nostro pianeta si trova in una era glaciale, durante la quale si alternano delle fasi glaciali vere e proprie (come quella terminata alla fine del Pleistocene) e delle più miti fasi interglaciali (come quella che stiamo vivendo).

Uno sguardo d'insieme all'alternanza di fasi fredde e fasi più miti può essere ottenuto dalle carote di ghiaccio dell'Antartide, le uniche così profonde da permetterci di risalire con continuità così indietro nel tempo da vedere l'alternanza delle fasi glaciali. I paleoclimatologi misurano il rapporto fra l'abbondanza nelle molecole d'acqua di due isotopi stabili dell'ossigeno:  $^{16}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ . Poiché le molecole contenenti  $^{16}\text{O}$  evaporano un po' più facilmente di quelle contenenti  $^{18}\text{O}$ , questo rapporto isotopico costituisce una misura indiretta della temperatura dell'ambiente in cui si è formato il ghiaccio. Inoltre, piccole bolle d'aria intrappolate nelle carote permettono di misurare la concentrazione di  $\text{CO}_2$  presente in atmosfera al momento della formazione della bolla.

In questo modo si ottengono ricostruzioni come quella mostrata in Figura 8, eseguita a partire da carote di ghiaccio estratte da un altopiano dell'Antartico chiamato *Dome C*. È evidente una fortissima correlazione fra temperatura e concentrazione di  $\text{CO}_2$ . Altrettanto evidente è l'alternanza tra fasi glaciali ed interglaciali, con cicli che durano approssimativamente centomila anni. La ricostruzione mostra che durante alcuni dei precedenti interglaciali i picchi di temperatura hanno raggiunto valori paragonabili a quelli dell'Olocene. La domanda ovvia è se una banchisa artica permanente fosse presente durante quelle fasi interglaciali. La risposta non è affatto scontata. La ricostruzione delle temperature



**Figura 8:** Differenze di temperatura rispetto alla media dell'ultimo millennio (linea superiore, scala a destra) e concentrazione della CO<sub>2</sub> atmosferica (linea inferiore, scala a sinistra) negli ultimi ottocentomila anni, ricostruite dalle carote di ghiaccio antartico del progetto EPICA. La linea tratteggiata quasi verticale mostra l'incremento di CO<sub>2</sub> dell'ultimo secolo. Le "T" indicano il termine delle fasi glaciali. I numeri indicano la successione degli stadi marini isotopici. Adattato da [14].

sulla base dei rapporti isotopici dell'ossigeno è una procedura assai delicata, soggetta ad enormi incertezze: molti altri fattori, oltre alla temperatura, influenzano quel rapporto. Ma soprattutto la ricostruzione si riferisce alle condizioni presenti nel luogo dove si è formato il ghiaccio, ovvero l'Antartide. Ben pochi dettagli possiamo dedurre sulle condizioni presenti agli antipodi, nell'Artico.

Maggiori indizi possono essere ricavati dalle evidenze geologiche sull'altezza del livello del mare. Durante una fase glaciale si accumula così tanta acqua nei ghiacciai che il livello del mare si abbassa sensibilmente. Si stima che esso sia calato di almeno 120 metri durante l'ultima fase glaciale. Analogamente, evidenze geologiche di un innalzamento del livello del mare segnalerebbero una fase con calotte glaciali più piccole di quelle odierne. Si stima che se la calotta glaciale della Groenlandia si sciogliesse il livello del mare potrebbe innalzarsi di quasi dieci metri. È bene ricordare che il livello del mare non è influenzato dallo scioglimento della banchisa, in quanto, galleggiando sull'acqua, essa già sposta un volume di liquido pari a quello che avrebbe se si sciogliesse (come è facile verificare osservando un bicchiere contenente acqua e cubetti di ghiaccio: il livello rimane invariato mentre i cubetti si sciolgono). Tuttavia, se la calotta di ghiaccio della Groenlandia dovesse sciogliersi è impensabile che nell'Oceano Artico possano mantenersi condizioni tali da consentire la formazione di una banchisa. Recenti studi [15] mostrano che durante l'interglaciale 11 (Figura 8) il livello del mare

potrebbe essere salito proprio di una decina di metri. Questo dato è soggetto a notevolissime incertezze, e potrebbe essere smentito da studi successivi. Di fatto, è l'unica evidenza che suggerisce uno scioglimento completo dei ghiacci artici in uno dei precedenti interglaciali. L'ipotesi che la copertura glaciale artica sia perdurata ininterrottamente per tutto il Pleistocene è sicuramente ancora nell'ambito del possibile.

## Che cosa ci riserva il futuro?

Il futuro è sempre nebuloso, ma chi sa leggere il passato riesce a vedere più lontano degli altri. Oscillazioni di circa cento parti per milione (fra 180 e 280 ppm) nella concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> sono associate all'alternarsi delle fasi glaciali ed interglaciali. Nell'ultimo secolo, a causa delle emissioni legate al consumo di combustibili fossili ed alle altre attività umane, la concentrazione di CO<sub>2</sub> è balzata a 400 ppm (Figura 8). Ad oggi, non ostante il Protocollo di Kyoto e gli altri accordi internazionali, l'incremento dei gas serra non accenna ad arrestarsi. È evidente che ci stiamo avventurando in una terra incognita.

Il primo segnale di un regime climatico senza precedenti nell'Olocene sarà il completo scioglimento estivo della banchisa artica. È del tutto verosimile che ciò avverrà nell'arco delle nostre vite. Già oggi l'Artico è un luogo molto diverso rispetto a pochi decenni fa. In epoca sovietica il *passaggio a Nord-Est* (cioè la rotta che collega la Scandinavia allo Stretto di Bering passando lungo la costa nord siberiana) era dominio di



pochi rompighiaccio a propulsione nucleare. A cominciare dal 2002, intermittenemente, il passaggio è rimasto libero dai ghiacci alla fine dell'estate. Nel 2009 è cominciato lo sfruttamento commerciale del passaggio. In estate decine di navi mercantili, inizialmente in convoglio con un rompighiaccio in testa, poi anche da sole, risparmiano migliaia di miglia marine viaggiando dal Nord Europa all'Asia orientale attraverso l'Artico, anziché passando per l'Oceano Indiano. Inoltre, le condizioni assai meno rigide di un tempo hanno permesso l'inizio di una intensa attività di esplorazione petrolifera. La prima piattaforma di trivellazione è stata inaugurata nel 2012 (suscitando le proteste di Greenpeace). Molte altre la seguiranno.

Il ritiro della banchisa ha anche gravi conseguenze ecologiche. Quando un ambiente si trasforma con questa rapidità le reti alimentari non riescono ad adattarsi. La tundra Artica sta cambiando aspetto e comincia ad essere colonizzata da alberi e cespugli. Fioriture estive di alghe fitoplanctoniche rendono disponibili grandi quantità di cibo per lo zooplankton e per consumatori di rango superiore, ma in modo più intermittenente che in precedenza. La funzione regolatrice dei mammiferi predatori (foche, volpi e orsi polari) viene meno col declinare del loro numero [16].

Questi cambiamenti, tutti già in atto, possono ancora essere considerati locali, limitati all'Artico. Dobbiamo preoccuparci? Gli orsi polari e le foche sono animali interessanti e buffi, ma pochi di noi riterrebbero giusto cambiare profondamente il proprio stile di vita per salvarli. Ma se ciò che sta succedendo è solo l'inizio di una catena di eventi che avranno ripercussioni globali, l'intera questione deve essere vista sotto una luce diversa.

Una prima minaccia risiede nel profondo della tundra. Quando un organismo muore e viene inglobato nel permafrost, il metano prodotto dai processi di decomposizione rimane intrappolato nel terreno ghiacciato. Analogamente, il metano prodotto dai processi di decomposizione che avvengono sul fondo del mare è sequestrato in sostanze gelatinose note come *clatrati*. Riscaldando il permafrost o il fondo del mare, si produce un rilascio di metano in atmosfera. Sfortunatamente, il metano è un gas serra ancora più potente della CO<sub>2</sub>. Questo costituisce una pericolosa re-

troazione positiva sul riscaldamento dell'Artico: maggiore è il livello del riscaldamento, maggiore è la quantità di metano rilasciata in atmosfera, che, a sua volta, incrementa ulteriormente il riscaldamento. Il livello di pericolo dipende da quanto metano esattamente è immagazzinato nella tundra e nell'oceano artico. Ma questo è un dato assai difficile da stimare [17].

Sarebbe in un certo senso tranquillizzante poter appurare con certezza che durante l'interglaciale 11 la banchisa artica è davvero scomparsa e che la calotta glaciale della Groenlandia si è sciolta. Infatti, questo evento non ha impedito poi al pianeta di ripiombare nella successiva fase glaciale, e quindi indicherebbe una relativamente facile reversibilità degli effetti di un eventuale rilascio di metano. D'altra parte, le carote di ghiaccio non mostrano bruschi aumenti delle concentrazioni di metano all'apice dell'interglaciale 11, probabilmente perché un processo di riscaldamento diluito sull'arco di diecimila anni non può aver prodotto concentrazioni di metano in atmosfera altrettanto alte di quelle che potrebbe produrre un riscaldamento di pari intensità che avvenga in uno o due secoli. I pezzi di questo rompicapo ancora non collimano bene insieme.

Una seconda minaccia è dovuta all'effetto dell'acqua dolce che si riverserebbe nell'Oceano Atlantico in seguito ad un massiccio scioglimento dei ghiacci. L'Atlantico si distingue nettamente dal Pacifico in quanto al suo estremo settentrionale l'acqua fredda e salata diviene così densa da affondare e produrre masse d'acqua profonde, che poi si spostano verso sud, in un viaggio che dura molti secoli. Questa *circolazione meridionale* potrebbe interrompersi in tempi relativamente rapidi (qualche decennio) se un improvviso afflusso di acqua dolce dovesse diluire troppo la salinità del Nord Atlantico. Il collasso della circolazione meridionale produrrebbe una diminuzione del trasporto di calore dall'equatore ai poli operato dall'Atlantico, ed un severa riorganizzazione della sua circolazione più superficiale, in particolare la corrente del Nord Atlantico, che è il prolungamento della famosa corrente del Golfo che riscalda le isole britanniche. Cambiamenti di questa portata modificherebbero il clima dell'Europa in modo drastico, e renderebbero i luoghi in cui viviamo assai diversi da come sono oggi. Per quanto ipotetica, la possibilità di un collasso

della circolazione meridionale dell'Atlantico è così verosimile che la ricerca di segnali precursori è un attivo campo di studio [18].

La terza minaccia è legata all'innalzamento del livello dei mari. Se si dovesse arrivare allo stadio in cui i ghiacci artici fossero assenti anche d'estate, l'Artico salterebbe verso uno stato molto più caldo dell'attuale (Figura 4). Lo scioglimento della calotta glaciale della Groenlandia, che già oggi perde più ghiaccio di quanto non se ne accumuli con le nevicate, accelererebbe fino a completarsi nel giro di qualche secolo. Quand'anche si scoprisse che questo nuovo stato è reversibile, il conseguente innalzamento dei mari avrebbe comunque cambiato la geografia del nostro pianeta.

In conclusione, se fra qualche decennio in estate la banchisa artica si sarà sciolta completamente, non si tratterà di una curiosità oceanografica. Sarà il segnale che di lì a poco un nuovo mondo potrebbe sostituirsi al vecchio.



- [1] Disponibile in rete alla pagina <http://www.nytimes.com/2013/08/24/opinion/the-next-hurricane-and-the-next.html>
- [2] Dati disponibili sul sito <http://www.hurricanes.gov>
- [3] Disponibile in rete alla pagina <http://www.chron.com/opinion/outlook/article/Neeley-Lack-of-hurricanes-helps-climate-change-4803578.php>
- [4] National Snow & Ice Data Center: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>
- [5] I. EISENMAN, J. S. WETTLAUER: "Nonlinear threshold behavior during the loss of Arctic sea ice", *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106** (2009) 28-32.
- [6] Bozza definitiva del quinto rapporto di valutazione (AR5) dell'IPCC *The Physical Science Basis*. Disponibile in rete all'indirizzo <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.U1FxpN8nHiM>
- [7] W. MASLOWSKI, J. C. KINNEY, M. HIGGINS, A. ROBERTS: "The Future of Arctic Sea Ice", *Annual Review Earth Planetary Sciences* **40** (2012) 625-654.
- [8] J. E. OVERLAND, M. WANG: "When will the summer Arctic be nearly sea ice free?", *Geophysical Research Letters* **40** (2013) 2097-2101.

- [9] La saga di Erik il Rosso è disponibile all'indirizzo <http://www.americanjourneys.org/aj-056/index.asp>. Una buona introduzione alla storia della colonia vichinga in Groenlandia è: JARED DIAMOND: *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Press (2005). Tr. it.: *Collasso. Come le società scelgono di morire o vivere*, Einaudi (2005).
- [10] <http://www.weeklystandard.com/Content/Protected/Articles/000/000/000/427zgwb.asp>
- [11] C. KINNARD, C. M. ZDANOWICZ, D. A. FISHER, E. ISAKSON, A. DE VERNAL, L. G. THOMPSON: "Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years", *Nature* **479** (2011) 509-513.
- [12] S. A. MARCOTT, J. D. SHAKUN, P. U. CLARK, A. C. MIX: "A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years", *Science* **339** (2013) 1198-1201.
- [13] L. POLYAK ET AL.: "History of sea ice in the Arctic", *Quaternary Science Reviews* **29** (2010) 1757-1778.  
S. FUNDER ET AL.: "A 10,000-Year Record of Arctic Ocean Sea-Ice Variability—View from the Beach", *Science* **333** (2011) 747-750.
- [14] D. LÜTHI ET AL.: "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present", *Nature* **453** (2008) 379-382.
- [15] M. E. RAYMO, J. X. MITROVICA: "Collapse of polar ice sheets during the stage 11 interglacial", *Nature* **483** (2012) 453-456.
- [16] E. POST ET AL.: "Ecological Consequences of Sea-Ice Decline", *Science* **341** (2013) 519-524.
- [17] F. M. O'CONNOR ET AL.: "Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: a review", *Reviews of Geophysics* **48** (2010) RG4005.
- [18] T. M. LENTON: "Early warning of climate tipping points", *Nature Climate Change* **1** (2011) 201-209.



**Francesco Paparella:** Laureato in Fisica presso l'Università di Torino, ha conseguito un dottorato in Geofisica presso l'Università di Genova. È attualmente ricercatore presso il Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento dove insegna Istituzioni di Fisica Matematica. Si occupa di meccanica dei fluidi (applicata alla geofisica) e di sistemi dinamici (applicati alla meccanica dei fluidi ed all'ecologia).